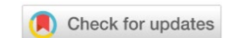
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 504.05/06
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-19-28

Оригинальное эмпирическое исследование

Повышение экологической безопасности предприятий стройиндустрии на основе современной технологии пылеподавления



EDN: JDCNLX

В.И. Беспалов ✉, **О.С. Гурова**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ izos-rgsu@mail.ru

Аннотация
Введение. В современном мире особое внимание уделяется качеству атмосферного воздуха. Одним из основных факторов негативного воздействия на атмосферу является выброс загрязняющих веществ, среди которых наиболее массово наблюдаются твердые (пылевые) частицы от промышленных источников. При высоких концентрациях пыли устройства очистки, даже обладая высокой эффективностью (до 95,0 %), не справляются с нагрузкой. Именно поэтому разработка и совершенствование высокоэффективных устройств очистки воздуха от пыли являются весьма актуальными. В связи с этим в качестве научной проблемы авторами выделена необходимость совершенствования инженерных средств очистки воздуха от пыли за счет разделения дисперсной фазы (пылевых частиц) и дисперсионной среды (воздуха), что в конечном счете приведет к повышению эффективности очистки. Целью данного исследования явилось повышение экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон на основе применения упомянутых высокоэффективных средств очистки воздуха от пыли.
Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи: применена физико-энергетическая концепция и разработана блок-схема физической модели процесса снижения загрязнения воздушной среды различными видами строительной пыли, разработано высокоэффективное и экономичное устройство гидродинамической очистки вентиляционного воздуха от плохо смачиваемой слипающейся пыли, проведены экспериментальные исследования для выявления реального диапазона значений эффективности очистки воздуха от пыли.
Материалы и методы. В основу исследований авторами положены методы физического моделирования, математического описания и статистической обработки экспериментальных данных.
Результаты исследования. В результате исследований установлено, что:
– в основу разработки высокоэффективного и экономичного устройства очистки воздуха от различных видов строительной пыли может быть положена предложенная авторами физико-энергетическая научная концепция, описывающая процессы загрязнения и снижения загрязнения воздушной среды;
– поэтапное рассмотрение процесса загрязнения воздушной среды может быть основой научного обоснования и описания процесса снижения загрязнения воздушной среды предприятий строительной индустрии;
– на основании выполненного анализа процесса снижения загрязнения воздушной среды различными видами строительной пыли возможна разработка блок-схемы физической модели этого процесса;
– изучение особенностей поведения и свойств пылевого аэрозоля и направленных на него внешних силовых воздействий дает возможность наметить основные направления, технологии и инженерные средства повышения эффективности процесса очистки и разработать высокоэффективное и экономичное устройство, реализующее этот процесс;
– для исследования диапазона изменения значений эффективности очистки воздуха от пыли проведен ряд экспериментальных исследований в лабораторных условиях.
Обсуждение и заключение. Выполненные исследования позволили установить, что повышение эффективности очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 обеспечивается в устройстве за счет ряда конструктивных изменений, приводящих к интенсификации смачивания, связывания и удаления из воздуха пылевых частиц. При этом высокие значения (96,5–98,7 %) интегральной эффективности обеспечивают нормативные экологические требования к качеству воздуха приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: экологическая безопасность, пылеподавление, устройство очистки воздуха, повышение эффективности

Благодарности. Авторы благодарят доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Производственная безопасность» С.Л. Пушенко за содействие в организации лабораторных экспериментов.

Для цитирования. Беспалов В.И., Гурова О.С. Повышение экологической безопасности предприятий стройиндустрии на основе современной технологии пылеподавления. *Безопасность природных и техногенных систем.* 2024;8(3):19–28. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-19-28

Original Empirical Research

Improving the Environmental Safety of Construction Industry Enterprises through the Use of Modern Dust Suppression Technologies

Vadim I. Bespalov ✉, **Oksana S. Gurova**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ izos-rgsu@mail.ru

Abstract

Introduction. In the modern world, special attention is paid to the quality of atmospheric air. One of the major contributors to air pollution is the release of harmful substances, including solid particles from industrial activities. These particles can accumulate in high concentrations, making it difficult for even the most efficient (up to 95.0%) cleaning devices to keep up. That is why the development and improvement of highly efficient air purification devices from dust are very relevant. In this regard, as a scientific problem, the authors highlighted the need to improve engineering means of air purification from dust by separating the dispersed phase (dust particles) and the dispersion medium (air), which ultimately will lead to an increase in cleaning efficiency. The aim of this study is to improve the environmental safety of industrial sites of construction industry enterprises and adjacent residential areas by using highly effective means of air purification.

To achieve this goal, we have developed a physics and power-engineering concept and created a block diagram of a physical model for reducing air pollution from construction dust. We have also developed a highly efficient and economical device for hydrodynamic purification of ventilation air from poorly wetted clumping dust. The experiments were conducted to identify the real range of values of the efficiency of air purification from dust.

Materials and Methods. The research is based on methods of physical modeling, mathematical description, and statistical analysis of experimental data.

Results. As a result of the research, it was found that:

– the basis for the development of a highly efficient and economical air purification device from various types of construction dust could be based on the physics and power-engineering scientific concept proposed by the authors, describing the processes of pollution and reduction of air pollution;

– step-by-step consideration of the process of air pollution could be the basis for scientific justification and description of the process of air pollution reduction in the construction industry;

– based on the analysis of the process of the reduction of air pollution by various types of construction dust, it was possible to develop a block diagram of a physical model of this process;

– the study of the behavior and properties of dust aerosol and external force influences directed at it made it possible to outline the main directions, technologies and engineering means to increase the efficiency of the cleaning process and develop a highly efficient and economical device that implemented this process;

– to study the range of changes in the values of the efficiency of air purification from dust, a number of experimental studies were conducted in laboratory conditions.

Discussion and Conclusion. The studies conducted allowed us to determine that an increase in air purification efficiency from dust with a SiO_2 content of 20–70% was achieved in the device through a series of design modifications that enhanced wetting, bonding, and removal of particulate matter from the air. Simultaneously, high levels of integrated efficiency (96.5–98.7%) ensured the compliance with regulatory environmental standards for atmospheric surface air quality.

Keywords: environmental safety, dust suppression, air purification device, efficiency improvement

Acknowledgements. The authors would like to thank Head of the Industrial Safety Department, Dr. Sci. (Engeneering), Professor S.L. Pushenko for his assistance in organizing laboratory experiments.

For citation. Bespalov VI, Gurova OS. Improving the Environmental Safety of Construction Industry Enterprises through the Use of Modern Dust Suppression Technologies. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(3):19–28. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-3-19-28

Введение. В настоящее время большим спросом у различных потребителей, связанных со строительной деятельностью, пользуются сухие строительные смеси. Кроме того, особое место при этом занимает производство связующих высокодисперсных материалов: гипса, цемента, плиточного клея, фасадного клея и других [1, 2]. На подготовительном технологическом этапе производства таких материалов в соответствии со стандартами осуществляются просеивание и дробление (измельчение) исходного сырья, например, клинкера. В целом же технология изготовления любой сухой строительной смеси представляет собой процесс, включающий в себя следующие основные этапы: засыпку измельченного сырья, смешивание разных ингредиентов и расфасовку смеси. В каждом конкретном случае технологии могут отличаться от базовой в зависимости от особенностей рецептов приготовления смесей, вида исходного продукта, количества и видов используемых ингредиентов и соответствующего им технологического оборудования.

С точки зрения обеспечения требуемых экологических нормативов содержания пылевых частиц в воздухе территорий промплощадок предприятий по изготовлению строительных смесей и связующих материалов наиболее уязвимыми являются участки дробления исходного сырья [3]. Именно здесь наблюдается интенсивное образование основных видов строительной пыли: цементной, гипсовой, песчаной и других с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 и с преобладающим размером частиц PM2,5 и PM10. При последующем выделении эта пыль приводит к превышению $ПДК_{рз}$ в воздухе рабочих зон предприятий строительной индустрии и $ПДК_{мр}$ ($ПДК_{сс}$) в воздухе приземного слоя атмосферы как территорий промышленных площадок этих предприятий, так и территорий прилегающих селитебных зон. Негативное воздействие пыли проявляется в случае ее проникновения в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, кожные покровы и слизистые оболочки. При этом наибольшую опасность представляют именно частицы пыли размером PM2,5 и PM10 [1, 4].

В результате по основным перечисленным выше видам промышленной пыли наблюдается превышение соответствующих значений ПДК в 5–25 раз, что составляет от 10 до 300 мг/м^3 без применения инженерных средств пылеподавления. Такое состояние воздушной среды приводит к негативному воздействию пыли на работников предприятий и население прилегающих территорий [5–7]. Необходимо еще отметить, что применение современных средств пылеподавления в виде устройств улавливания пыли в помещениях (вытяжные панели, зонты и т. п.) с последующим удалением этой пыли из внутренних объемов производственных помещений с максимальными значениями ее концентрации в большинстве случаев, с одной стороны, эффективно обеспечивают санитарно-гигиенические требования, но, с другой стороны, создают при этом довольно высокие концентрации пыли, с которыми современные устройства очистки воздуха, даже обладая высокой эффективностью (до 95,0 %), не справляются и не обеспечивают соблюдения экологических нормативов. В этом заключается научная проблема совершенствования инженерных средств обеспыливания выбрасываемого в атмосферу воздуха за счет повышения эффективности очистки воздуха от пыли (свыше 96,0 %). Таким образом, целью данного исследований является разработка высокоэффективных современных технологий и средств пылеподавления для повышения экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон.

Материалы и методы. В исследовании использовались аналитический метод изучения накопленного опыта в научно-технической сфере, а также методы построения физической модели в совокупности с математическим описанием результирующих характеристик данного процесса. Кроме того, использованы методы статистической обработки результатов лабораторных исследований, полученных авторами, и сопоставления их с результатами аналогичных исследований других ученых.

При этом в качестве объекта исследования выбрано устройство, осуществляющее очистку воздуха от пыли строительных производств как один из основных этапов процесса пылеподавления, эффективность которого зависит от основных физико-химических свойств дисперсной фазы и дисперсионной среды пылевого аэрозоля при внешнем воздействии на него с целью его разрушения. А предметом исследования является повышение эффективности устройства очистки воздуха от пыли до уровня обеспечения экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон.

Наиболее приемлемым для разработки устройства очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 является подход, основанный на применении физико-энергетический концепции [5], который дает возможность установить физические связи между всеми объектами процесса снижения загрязнения (пылевым аэрозолем, устройством очистки с его активной зоной и внешними силовыми воздействиями), наметить технологии повышения эффективности очистки и разработать конструкцию наиболее эффективного для рассматриваемых условий устройства очистки воздуха от перечисленных видов пыли предприятий строительной индустрии.

Результаты исследования. Разработка высокоэффективного и экономичного устройства очистки воздуха от строительной пыли основана на предложенном авторами физико-энергетическом научном подходе, который позволяет описать процессы загрязнения и снижения загрязнения воздушной среды [5–7]. Эта концепция базируется на рассмотрении дисперсной системы «загрязняющее вещество», изменяющей в процессе загрязнения воздуха параметры своего состояния и переходящей из одного качества (пылевой материал) в другое (пылевой аэрозоль) [5, 8]. Так, при обработке сырья (строительных материалов) на технологическом оборудовании наблюдается образование пылевых частиц и формирование пылевого материала. Затем образовавшийся пылевой материал выделяется из объема сырья в пространство производственного помещения и формируется пылевой аэрозоль. И, наконец, пылевой аэрозоль, распространяясь в пространстве производственного помещения, выделяется в воздух приземного слоя атмосферы территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон с последующим рассеиванием.

При этом необходимо отметить, что этапы образования и внутреннего выделения пыли позволяют осуществить возврат пылевых частиц в исходный технологический материал, что с экологической и экономической позиций весьма выгодно, но не всегда реализуемо с точки зрения требований технологического регламента. А другие этапы связаны с аэрозольным состоянием пыли, когда пылевые частицы находятся во взвешенном в воздухе состоянии, и выделить их из аэрозоля с последующим возвратом в технологическое сырье либо не представляется возможным, либо вызывает значительные трудности.

Такое поэтапное рассмотрение процесса загрязнения воздушной среды явилось основой научного обоснования и описания процесса снижения загрязнения рассматриваемыми видами пыли воздушной среды предприятий строительной индустрии. При этом наблюдается четкое соответствие этапов процесса снижения загрязнения этапам процесса загрязнения атмосферы [8, 9]:

– первый этап: связывание образовавшихся в процессе обработки сырья на технологическом оборудовании частиц пыли;

– второй этап: задержание в зоне обрабатываемого сырья несвязавшихся частиц пыли из числа образовавшихся во внутреннем объеме производственного помещения;

– третий этап: улавливание пылевого аэрозоля, выделившегося во внутренний объем производственного помещения, с целью локализации (предотвращения распространения) пылевых частиц в заранее выделенной ограниченной зоне, их удаления из этой зоны, транспортировки в зону очистки;

– четвертый этап: очистка воздуха (дисперсионной среды) от пылевых частиц (дисперсной фазы) пылевого аэрозоля, уловленного и направляемого на выброс в приземный слой атмосферы путем их максимального разделения;

– пятый этап: рассеивание оставшегося после очистки количества пылевых частиц непосредственно перед выбросом их в приземный слой атмосферы путем интенсивного разудаления пылевых частиц при их выводе в атмосферу и ускоренном гравитационном высеве в заранее выделенной, строго ограниченной зоне на территории промышленной площадки, что обеспечивает дополнительное снижение концентрации пылевых частиц в приземном слое атмосферы до уровня $ПДК_{м.р.}$ ($ПДК_{с.с.}$).

Основная цель каждого этапа в процессе снижения загрязнения заключается в уменьшении устойчивости и в конечном счете разрушении пылевого аэрозоля как дисперсной системы с помощью заранее подготовленных по параметрам направленных на него внешних воздействий различной физической природы.

Проведенный авторами анализ позволил рассматривать процесс снижения загрязнения воздушной среды, реализуемый двумя основными циклами [8, 9]:

I цикл — снижение загрязнения технологического сырья (технологического оборудования), включающий в себя разработку нового или совершенствование действующего основного производственного оборудования и организацию технологических процессов, исключающих этапы образования и выделения загрязняющих веществ;

II цикл — снижение загрязнения воздуха, включающий в себя применение в действующем или проектируемом технологическом процессе дополнительных инженерно-технических устройств, конструкций, аппаратов, локализующих распространение пылевого аэрозоля и обеспечивающих его разрушение как дисперсной системы.

Необходимо учитывать, что мероприятия, которые относятся к первому циклу, зачастую не могут быть реализованы из-за нарушений требований, предъявляемых к сырью и технологическим процессам. Именно поэтому авторами положен в основу дальнейших исследований и разработок второй цикл процесса снижения загрязнения воздушной среды.

Таким образом, основная цель второго цикла процесса снижения загрязнения воздушной среды заключается в разрушении пылевого аэрозоля путем разделения дисперсной фазы (пылевых частиц) и дисперсионной среды (воздуха) за счет последовательной реализации этапов улавливания пыли, очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли в атмосфере. Рассмотрим последовательно физические основы каждого из этапов II цикла.

В результате исследований авторами установлено, что физическая сущность процесса улавливания пыли заключается в целенаправленном воздействии на выделившийся пылевой аэрозоль заранее подготовленными по параметрам, либо дополнительной (Д–II.1) дисперсной системой, либо силовым полем, приводящим к образованию двух дисперсных систем [8, 10]:

– остаточной (О–II.1), в которой содержится минимальное количество (ориентированное на соблюдение $ПДК_{р.з}$) пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая пространственно остается и распространяется во внутреннем объеме производственного помещения (воздухе рабочей зоны);

– промежуточной (П–II.1), в которой содержится максимальное количество уловленных и удаленных из зоны выделения пылевых частиц, и которая обладает повышенной устойчивостью в состоянии пылевого аэрозоля.

Дальнейшие исследования авторов позволили также раскрыть физическую сущность процесса очистки воздуха от пыли, которая заключается в целенаправленном воздействии на твердые частицы пылевого аэрозоля (промежуточная (П–II.1) дисперсная система) в активной зоне очистки после улавливания заранее подготовленными по параметрам либо дополнительной (Д–II.2) дисперсной системой, либо силовым полем, приводящим к образованию двух дисперсных систем [8, 10]:

– остаточной (О–II.2), в которой содержится максимальное количество пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая обладает повышенной устойчивостью, перейдя в состояние пылевого материала и накапливаясь в специальных пылесборниках (накопителях);

– промежуточной (П–II.2), в которой содержится минимальное количество (ориентированное на соблюдение $ПДК_{м.р.}$ или $ПДК_{с.с}$) пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая направляется на выброс в приземный слой атмосферы.

Дальнейшие исследования авторов позволили также раскрыть физическую сущность принудительного рассеивания оставшихся частиц пыли в приземном слое атмосферы, который реализуется в тех случаях, когда процесс очистки не позволяет достичь такой концентрации пыли в экологически значимых точках приземного слоя атмосферы, которая бы соответствовала $ПДК_{м.р.}$ ($ПДС_{с.с.}$). Так, физическая сущность процесса рассеивания пылевых частиц заключается в целенаправленном воздействии на твердые частицы пылевого аэрозоля (промежуточная (П–II.2) дисперсная система) в активной зоне рассеивания после очистки заранее подготовленными по параметрам, либо дополнительной (Д–II.3) дисперсной системой, либо силовым полем, приводящим к образованию двух дисперсных систем [8, 10]:

– остаточной (О–II.3), в которой содержится основное количество выбрасываемых пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая в воздушном пространстве за пределами экологически значимых зон подвержена интенсивному осаждению на подстилающие поверхности, обладая повышенной устойчивостью при переходе в состояние пылевого материала;

– остаточной (О–II.4), в которой содержится минимальное количество (ориентированное на соблюдение $ПДК_{м.р.}$ или $ПДК_{с.с}$) пылевых частиц как дисперсной фазы, и которая остается витать в приземном слое атмосферы.

На основании выполненного анализа процесса снижения загрязнения воздушной среды различными видами строительной пыли авторами представлена блок-схема физической модели этого процесса с учетом рассмотренных выше двух циклов для условий реализации технологических процессов на предприятиях строительной индустрии (рис. 1) [8, 11, 12].

Наглядная иллюстрация блок-схемы физической модели снижения загрязнения воздушной среды позволяет заключить следующее. Во-первых, несмотря на ряд преимуществ I цикл процесса снижения загрязнения воздушной среды в реальных условиях организации технологического процесса на предприятиях строительной индустрии в подавляющем большинстве случаев не реализуем из-за нарушения технологических регламентов.

Во-вторых, в рамках II цикла этап улавливания определяет эффективность обеспечения санитарно-гигиенических норм в воздухе рабочих зон производственных помещений, в современных условиях организации технологических процессов на предприятиях строительной индустрии они обеспечены весьма эффективными и экономичными инженерными средствами (вытяжными устройствами, панелями и другими конструкциями).

В-третьих, в рамках II цикла этап принудительного рассеивания оставшихся частиц пыли в приземном слое атмосферы является вспомогательным для процесса очистки воздуха и применяется в весьма редких случаях.

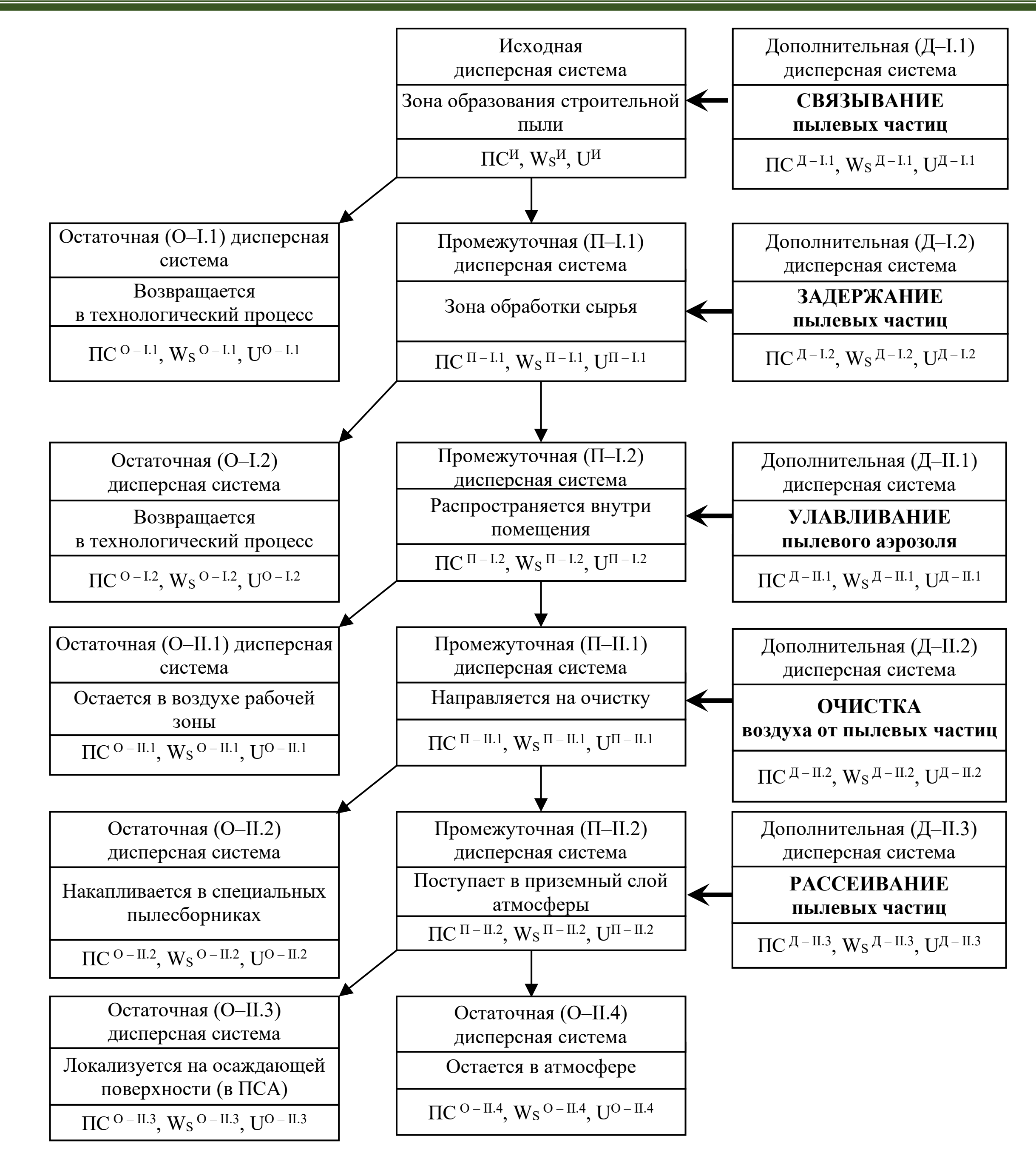


Рис. 1. Физическая модель процесса снижения загрязнения воздушной среды

Таким образом, авторами в основу практических разработок положен этап очистки воздуха от различных видов строительной пыли, для которого далеко не исчерпаны возможности повышения эффективности. Повышение эффективности средств очистки возможно на основе представленных выше результатов теоретических исследований и, в частности, блок-схемы физической модели снижения загрязнения воздушной среды [13–15].

Изучение особенностей поведения и свойств пылевого аэрозоля и направленных на него в процессе очистки внешних дисперсных систем либо силовых воздействий позволило авторам наметить основные направления, соответствующие им технологии и инженерные средства повышения эффективности процесса очистки. Одним из ярких представителей таких средств является разработанное авторами высокоэффективное и экономичное устройство, предназначенное для гидродинамической очистки вентиляционного воздуха (рис. 2).

Основной конструктивный элемент разработанного устройства — его цилиндрический корпус (1), который оканчивается коническим участком (2). Частично внутри и частично снаружи корпуса (1) расположена цилиндрическая камера (3), имеющая днище (4) в форме конуса. При этом камера (3) разделена сплошным полым конусом-отбойником (5) на две части: нижнюю и верхнюю. На внутренних боковых поверхностях этих частей расположены щелевые воздухозаборники (6). Входной тангенциальный наклонный патрубок (7) и выходной тангенциальный патрубок (8) присоединены к боковым поверхностям верхней и нижней частей камеры (3). Патрубок (7) в плане заходит в корпус (1) в верхней его части «против часовой стрелки», а патрубок (8) — в нижней его части «по часовой стрелке». При этом патрубки (7) и (8) обращены в одну сторону.

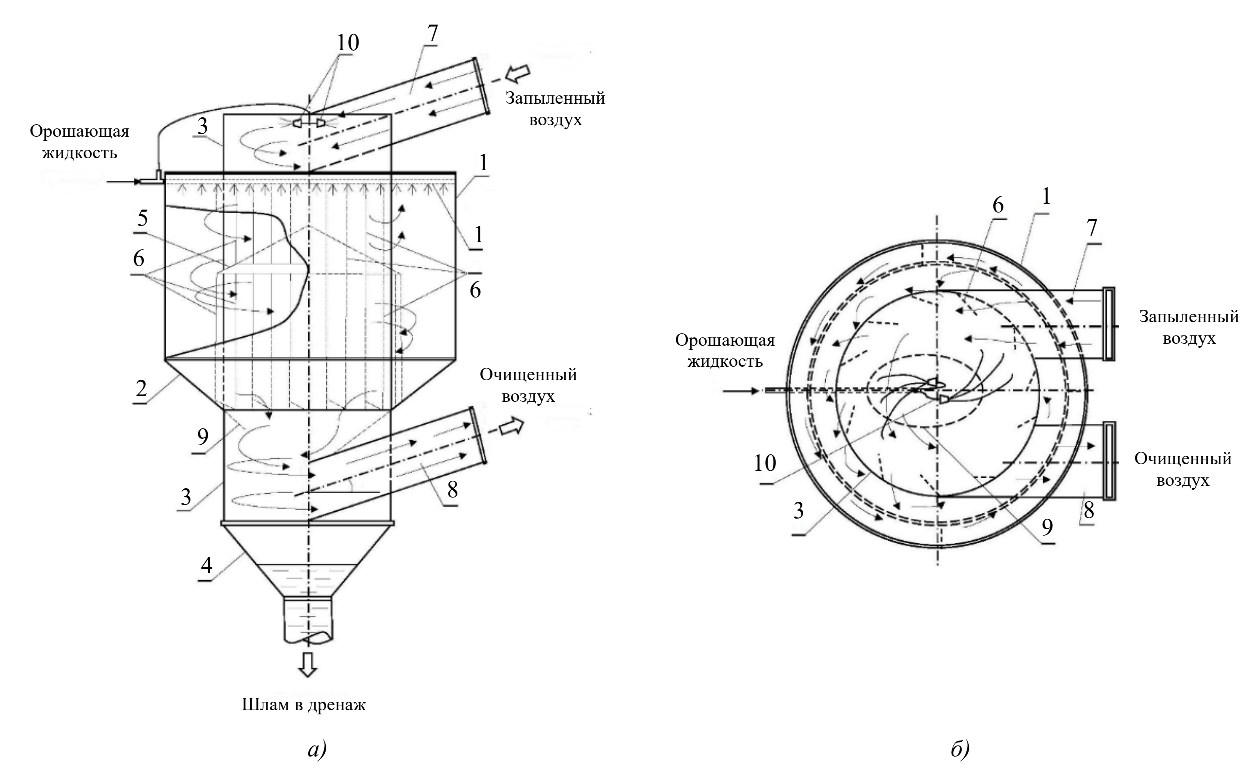


Рис. 2. Устройство гидродинамической очистки вентиляционного воздуха от плохо смачиваемой слипающейся пыли, образующейся на предприятиях строительной индустрии: *а* — вид спереди; *б* — вид сверху

Упомянутые выше щелевые воздухозаборники (6) выполнены в виде прямоугольных щелевых отверстий. Причем в верхней части камеры (3) кромки щелевых воздухозаборников (6) отогнуты внутрь камеры (3), а в нижней части — наружу таким образом, чтобы и в верхней, и в нижней частях поток воздуха захватывался.

Нижняя часть камеры (3) оснащена конусом (9), который совмещен с коническим участком (2), а основание расположено по нижней кромке воздухозаборников (6). Система гидродинамической очистки в устройстве является трехступенчатой и включает в себя:

– две форсунки (10), которые тангенциально направлены по входящему потоку запыленного воздуха;

– кольцевой перфорированный трубопровод (11), установленный под верхней стенкой корпуса (1) в кольцевой полости между стенками корпуса (1) и камеры (3) с выходными отверстиями, направленными вертикально вниз;

– гидрофильтр, образованный сплошной жидкостной пленкой, стекающей с кромок конуса (9).

Принцип работы устройства заключается в следующем. Запыленный воздушный поток от технологического оборудования поступает во входной тангенциальный патрубок (7), а затем — во внутреннюю полость верхней части камеры (3) и спутно орошается каплями диспергированной жидкости, которые смачивают, связывают и удаляют из потока определенное количество пылевых частиц (первая ступень очистки) и которые формируются с помощью форсунок (10). В результате орошения получаемый шлам перемещается по камере (3) сверху вниз на конус-отбойник (5). А пылегазожидкостная смесь благодаря воздухозаборникам (6) с загнутыми внутрь кромками и установленному сплошному полому конусу-отбойнику (5) выводится из верхней части камеры (3) в кольцевую полость между ней и корпусом (1), попадая в плотную кольцевую капельно-жидкостную завесу, захватывающую также определенное количество пылевых частиц (вторая ступень очистки), формируемую кольцевой перфорированной трубой (11).

При этом, стекая с поверхности конуса-отбойника (5), шлам образует плотную кольцевую пленочную завесу (третья ступень очистки), которая смачивает и связывает значительную часть пылевых частиц. Пройдя эту завесу, остаточно запыленный поток захватывается отогнутыми наружу кромками воздухозаборника (6) в нижней части камеры (3) и возвращается во внутреннюю ее полость.

В конечном счете общий поток шлама из кольцевой полости между камерой (3) и корпусом (1) стекает по коническому участку (2) корпуса (1), а затем по конусу (9), образуя еще одну кольцевую пленочную завесу с различной толщиной пленки (четвертая ступень очистки), которая увеличивается в сторону выходного патрубка (8). Шлам выводится из устройства через коническое днище (4). Таким образом, пройдя последовательно четыре ступени очистки, максимально очищенный от частиц пыли воздушный поток выбрасывается в атмосферу через выходной патрубок (8). Все описанные выше конструктивные особенности разработанного устройства определяют его интегральную эффективность при очистке воздуха от пыли.

Для исследования диапазона изменений значений этой эффективности авторами был проведен ряд экспериментальных исследований в лабораторных условиях. В ходе их проводили измерения интегральной эффективности очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 (пыль песка, средний медианный диаметр пылевых частиц составлял 50 мкм, насыпная плотность пылевого материала — 1 860 кг/м^3, слабо слипающаяся с разрывной прочностью 200 Па, угол естественного откоса — 57 °, краевой угол смачивания — 10 °), изменяя конструкцию и параметры конуса-отбойника (5), а также конструкцию и расположение щелевых воздухозаборников (6). Результаты исследований приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Экспериментальные значения интегральной эффективности $E_{эф}$, %, очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 в зависимости от конструкции конуса-отбойника (5) и расположения щелевых воздухозаборников (6) при остальных оптимальных конструктивных решениях

Расположение щелевых воздухоза-борников (6) в верхней части камеры (3)	Конструкция конуса-отбойника (5)								
	Кромки конуса-отбойника совпадают со стенками камеры (3)			Кромки конуса-отбойника выступают за пределы камеры (3)			Кромки конуса-отбойника образуют зазор с внутренними стенками камеры (3)		
	конический	сферический	эллипсовидный	конический	сферический	эллипсовидный	конический	сферический	эллипсовидный
По всей высоте корпуса (1)	86,9	85,7	83,9	98,7	98,5	91,8	85,2	84,8	83,1
На верхней и нижней частях камеры (3) частично по высоте корпуса (1)	84,1	83,8	83,5	95,3	94,9	88,6	83,2	82,9	82,6

Таблица 2

Экспериментальные значения интегральной эффективности $E_{эф}$, %, очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO2 в зависимости от конструкции щелевых воздухозаборников

Конструкция щелевых воздухозаборников (6) в плане		В верхней части камеры (3)	
		с отогнутыми наружу кромками по направлению потока	с отогнутыми внутрь кромками навстречу потоку
В нижней части камеры (3)	С отогнутыми наружу кромками	95,8	98,7
	С разведенными наружу кромками	93,4	97,2

Обсуждение и заключение. Анализ результатов экспериментальных исследований в лабораторных условиях позволяет сделать следующие выводы. Так, по данным таблицы 1 видно, что максимальное значение интегральной $E_{эф}$ с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 составляет 98,7 % в том случае, когда щелевые воздухозаборники (6) расположены в верхней части камеры (3) по всей высоте корпуса (1).

По данным таблицы 2 видно, что это же максимальное значение интегральной $E_{эф}$ с содержанием от 20 до 70 % SiO_2, составляющее 98,7 %, обеспечивается тем, что в конструкции щелевых воздухозаборников (6) в плане в верхней части камеры (3) кромки отогнуты внутрь навстречу потоку, а в нижней части камеры (3) у щелевых воздухозаборников (6) кромки отогнуты наружу.

В заключение следует отметить, что повышение (до 96,5–98,7 %) $E_{эф}$ с содержанием от 20 до 70 % SiO_2 обеспечивается в предлагаемом устройстве за счет ряда конструктивных изменений, приводящих к интенсификации смачивания, связывания и удаления из воздуха пылевых частиц.

Так, например, установка форсунок (10) и кольцевой перфорированной трубы (11) повышает вероятность встречи и захвата частиц пыли каплями диспергированной жидкости. При этом аэродинамические характеристики пылегазожидкостного потока при спутном орошении поддерживаются постоянными.

Кроме того, коаксиально пропущенная через корпус (1) устройства цилиндрическая камера (3) способствует поддержанию равномерности распределения закрученного воздушного потока при его выходе из камеры (1) через щелевые воздухозаборники (6).

Конструктивное исполнение конуса-отбойника (5) позволяет равномерно распределять воздух, поступающий из объема камеры (3), что, в свою очередь, способствует образованию плотной завесы в виде кольцевой пленки, которая выполняет роль дополнительного очистного фильтра (третьей ступени очистки), установленного на пути закрученного в кольцевой полости пылегазожидкостного потока.

Последовательное перемещение пылевоздушного потока в полости устройства через все зоны очистки воздуха от пыли обеспечивают воздухозаборники (6). При этом форма и расположение кромок щелей позволяют стабилизировать аэродинамику в полости устройства.

Кроме того, дополнительный вклад в повышение эффективности вносит конус (9), форма и расположение которого создают дополнительную кольцевую пленочную завесу с различной толщиной пленки (четвертая ступень очистки), она создается на пути потока воздуха за счет стекания шлама с кромок меньшего основания конуса (9) и увеличивается по толщине в сторону выходного патрубка (8). Также конструкция конуса (9) обеспечивает отвод шлама из устройства в зоне удаления очищенного воздуха при значительном снижении брызгоуноса в выходной патрубок (8). При этом уклон выходного патрубка (8) способствует снижению брызгоуноса.

Необходимо отметить, что для обеспечения стабильной, надежной и всесезонной эксплуатации устройства в качестве орошающей жидкости необходимо использовать водные растворы, не замерзающие даже при отрицательных значениях температуры окружающего воздуха. В случае использования воды устройство необходимо содержать в закрытых отапливаемых помещениях.

В заключение следует отметить, что разработанное устройство очистки воздуха от пыли со всеми описанными выше конструктивными особенностями обеспечивает требуемую интегральную эффективность, за счет высоких значений (96,5–98,7 %) которой, в свою очередь, соблюдаются нормативные экологические требования к качеству воздуха приземного слоя атмосферы.

Таким образом, в результате выполненных исследований достигнута конечная цель — определена возможность повышения экологической безопасности территорий промышленных площадок предприятий стройиндустрии и прилегающих селитебных зон путем разработки и применения высокоэффективных (не менее 96,0 %) современных технологий и средств пылеподавления, к числу которых относится предложенное авторами устройство очистки воздуха от пыли с содержанием от 20 до 70 % SiO_2.

Список литературы / References

1. Покотило В.Э., Стрежнев Д.О., Толмачёва Л.В. Исследование химических загрязнений окружающей среды. В: *Сборник статей и тезисов докладов IV международной междисциплинарной конференции «Достижения современной науки и образования». Ставрополь. 2018*. Таганрог: ЭльДирект; 2018. С. 59–61.

Pokotilo VE, Strezhnev DO, Tolmacheva LV. Study of Chemical Pollution of the Environment. In: *Achievements of modern science and education. Collection of articles and abstracts of the IV International Interdisciplinary Conference. Stavropol. 2018*. Taganrog: El'Direkt; 2018. P. 59–61. (In Russ.)

2. Андреева Е.В., Кладо Т.Н. *Атмосфера и жизнь.* Ленинград: Гидрометеорологическое издательство; 1963. 268 с.

Andreeva EV, Klado TN. *Atmosphere and Life.* Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1963. 268 p. (In Russ.)

3. Кулагина Т.А., Андруняк И.В. *Технологические процессы и загрязняющие выбросы*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2019. 206 с.

Kulagina TA, Andrunyak IV. *Technological Processes and Polluting Emissions*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2019. 206 p. (In Russ.)

4. Малашкина А.В. Факторы оценки влияния промышленных городов на здоровье населения. В: *Труды I Национальной научно-практической конференции с международным участием «Инновации природообустройства и защиты окружающей среды».* Саратов: Издательство «КУБиК»; 2019. С. 196–199.

Malashkina AV. Factors for Assessing the Impact of Industrial Cities on Public Health. In: *Proceedings of the 1st National Scientific and Practical Conference with international participation "Innovations in environmental management and environmental protection".* Saratov: KUBiK Publishing House; 2019. PC. 196–199. (In Russ.)

5. Lysova E., Paramonova O., Samarskaya N., Gyrova O., Tsarevskaya I. Application of Physical and Energetic Approach to Estimation and Selection of Atmospheric Protection Systems for Energetic Devices. *MATEC Web of Conferences.* 2018;170:04013. https://doi.org/10.1051/matecconf/201817004013

6. Momei Qin, Murphy BN, Isaacs KK, McDonald BC, Quanyang Lu, McKeen SA, et al. Criteria Pollutant Impacts of Volatile Chemical Products Informed by Near-Field Modelling. *Nature Sustainability.* 2021;4(2):129–137. https://doi.org/10.1038/s41893-020-00614-1

7. Халиков И.С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений. *Экологическая химия.* 2018;27(2):76–85.

Khalikov IS. Identification of Natural Objects Contamination by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons with the Use of Molecular Relations. *Ekologicheskaya khimiya.* 2018;27(2):76–85. (In Russ.)

8. Bespalov V, Gurova O, Samarskaya N, Paramonova O. Classification of Air Pollution Criteria for the Improvement of Methodical Approaches to Ensure the Environmental Safety of Major Cities. *E3S Web of Conferences.* 2019;135:01033. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501033 (accessed: 04.05.2024).

9. Palliyarayil A, Saini H, Vinayakumar K, Selvarajan P, Vinu A, Kumar NS, et al. Advances in porous material research towards the management of air pollution. *Emergent Materials.* 2021;4:607–643. https://doi.org/10.1007/s42247-020-00151-9

10. Садунишвили Т.А., Хатисашвили Г.А., Гурова О.С., Самарская Н.С. *Глобальные экологические проблемы и биотехнологический подход.* Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 146 с.

Sadunishvili TA, Khatisashvili GA, Gurova OS, Samarskaya NS. *Global Environmental Issues and Biotechnological Approach.* Monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 146 p. (In Russ.)

11. Samarskaya N, Paramonova O, Lysova E. Study of the Air Pollution Reduction Process in the Production of Film-Forming Substances for Quick-Drying Enamels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;666:042072 http://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042072

12. Bespalov V, Gurova O. Development of an Integrated Approach to the Selection of Remediation Measures and Environmental Technologies for their Implementation. *E3S Web of Conferences*. 2021;258:08027. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125808027

13. Samarskaya N, Gyrova O. Analysis of the Results of Theoretical Calculations Based on the Methodology for Making a Decision on the Choice of Optimal Technologies for Dedusting with Foam. *AIP Conference Proceedings.* 2022;2503(1):040004. https://doi.org/10.1063/5.0099703

14. Bespalov VI, Gurova OS. Scientific Substantiation of New Concept for Environmental Technologies Choice. *AIP Conference Proceedings.* 2022;2503(1):040005. https://doi.org/10.1063/5.0099700

15. Беспалов В.И., Лысова Е.П., Парамонова О.Н., Самарская Н.С. Обоснование выбора научного подхода для формирования максимально эффективных способов и средств снижения загрязнения воздушной среды при эксплуатации энергетических установок. *Инженерный вестник Дона.* 2018;(3). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_42_Bespalov_Lysova.pdf_c86775c35f.pdf (дата обращения: 04.05.2024).

Bespalov VI, Lysova EP, Paramonova ON, Samarskaya NS. Justification of the Scientific Approach Choice for Formation of the Most Effective Ways and Means of Reducing Air Pollution in the Operation of Power Plants. *Engineering journal of Don.* 2018;(3). URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_42_Bespalov_Lysova.pdf_c86775c35f.pdf (accessed: 04.05.2024). (In Russ.)

Об авторах:

Вадим Игоревич Беспалов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 6778-4627, ORCID, ResearcherID, ScopusID, izos-rgsu@mail.ru

Оксана Сергеевна Гурова, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 1852-507, ORCID, ResearcherID, ScopusID, okgurova@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

В.И. Беспалов: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство.

О.С. Гурова: анализ результатов исследований, корректировка выводов, графическое оформление, доработка текста.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vadim I. Bespalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 6778-4627, ORCID, ResearcherID, ScopusID, izos-rgsu@mail.ru

Oksana S. Gurova, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Environmental Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code: 1852-507, ORCID, ResearcherID, ScopusID, okgurova@yandex.ru

Claimed Contributorship:

VI Bespalov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, academic advising.

OS Gurova: research results analysis, conclusions correction, graphic design, text revision.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 13.06.2024
Поступила после рецензирования / Revised 07.07.2024
Принята к публикации / Accepted 15.07.2024